

BD

Partial Translation of Japanese Patent
Laying-Open No. 7-71924

... omitted ...

Intensity reflectance R of the thin film is calculated theoretically by the following equation. The subscript ' indicates a complex, and i denotes the imaginary unit.

$$R = | r' |^2$$

$$= r' \cdot r'^* \quad \dots\dots (数1)$$

where r' is the amplitude (complex) reflectance of the thin film, and r'* is the conjugate complex of r'. By defining the variables as set forth below, r' is represented by equation (2) - equation (8).

r01': amplitude (complex) reflectance at interface 24 between air and thin film 21

r12': amplitude (complex) reflectance at interface 25 between thin film 21 and substrate 23

δ': optical path difference generated by one reciprocation in thin film

- λ : wavelength of illuminating light
- d : thickness of thin film
- n0 : refractive index of air (= 1)
- n' : complex refractive index of thin film. $n' = n - ik$
- n2' : complex refractive index of substrate. $n2' = n2 - ik2$
- n2 : refractive index of substrate at wavelength λ
- k2: : absorption coefficient of substrate at wavelength λ
- θ: : incident angle
- θ1' : refracting angle within thin film
- θ2' : refracting angle within substrate

$$r' = \frac{r_{01}' + r_{12}' \exp(-i\delta')}{1 + r_{01}' r_{12}' \exp(-i\delta')} \quad \dots (2)$$

$$\delta' = \frac{2\pi}{\lambda} 2n' d \cos \theta_1' \quad \dots (3)$$

$$n_0 \sin \theta = n' \sin \theta_1' = n_n' \sin \theta_n' \quad (\text{Snell's law}) \quad \dots (4)$$

The amplitude reflectance at the interface can be calculated by the Fresnel's formula. In the case where illuminating light 32 is P-polarized light,

$$r_{01}' = \frac{n' \cos \theta - n_0 \cos \theta_1'}{n' \cos \theta + n_0 \cos \theta_1'} \quad \dots (5)$$

$$r_{12}' = \frac{n_2' \cos \theta_1' - n' \cos \theta_2'}{n_2' \cos \theta_1' + n' \cos \theta_2'} \quad \dots (6)$$

In the case where the illuminating light is S-polarized light,

$$r_{01}' = \frac{n_0' \cos \theta' - n' \cos \theta_1'}{n_0' \cos \theta' + n' \cos \theta_1'} \quad \dots (7)$$

$$\gamma_{12}' = \frac{n' \cos \theta_1' - n_2' \cos \theta_2'}{n' \cos \theta_1' + n_2' \cos \theta_2'} \quad \dots (8)$$

Namely, the logic value Rth of the intensity reflectance of the thin film can be represented by the function of Rth (n_0 , d , n , k , n_2 , k_2 , θ , λ).

... omitted ...

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 07-071924

(43)Date of publication of application : 17.03.1995

(51)Int.Cl.

G01B 11/06

G01N 21/45

G01N 21/59

(21)Application number : 05-217202

(71)Applicant : HITACHI LTD

(22)Date of filing : 01.09.1993

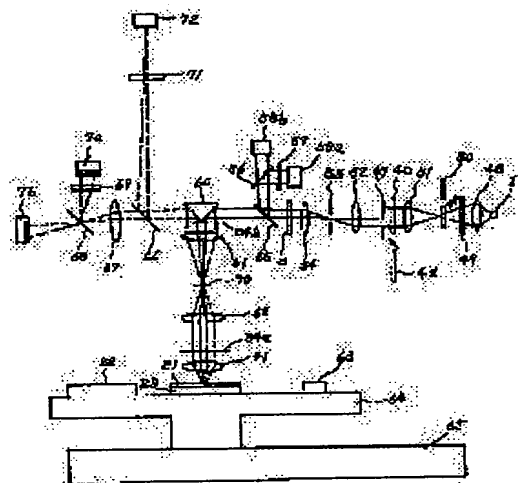
(72)Inventor : IWATA HISAFUMI
AIBA YOSHIHIKO
NAGATSUKA TOSHIHARU
KUBOTA HITOSHI

(54) METHOD AND DEVICE FOR MEASURING THIN FILM CHARACTERISTICS

(57)Abstract:

PURPOSE: To measure film thickness, and refractive index and absorption coefficient in the photosensitive wavelength, of a photosensitive thin film.

CONSTITUTION: A light source 1 forms an illuminating light containing the monochromatic light of the photosensitive wavelength band of a film 21 to be measured and the light of the non-photosensitive wavelength band by a filter 4C. The illuminating light made incident on an objective lens 41 without being passed near the optical axis by a light shielding plate 47 forms a converged light to irradiate the film 21. The reflected light causes an interference fringe of equal inclination on the rear focus surface 34a of the objective lens 41, the interference fringe in the photosensitive wavelength is detected by a linear sensor 7b, and the linear sensor 7b detects the interference fringe in the non-photosensitive wavelength through a monochromatic color filter 69. A reference sample 22 having known refractive index and absorption coefficient is also detected.



LEGAL STATUS

[Date of request for examination] 26.03.1999

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number] 3106790

[Date of registration] 08.09.2000

[Number of appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's
decision of rejection]

[Date of extinction of right]

Copyright (C); 1998,2003 Japan Patent Office

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開平7-71924

(43) 公開日 平成7年(1995)3月17日

(51) Int.Cl. ⁶	識別記号	庁内整理番号	F I	技術表示箇所
G 0 1 B 11/06	G			
G 0 1 N 21/45	A	9118-2J		
21/59	Z	9118-2J		

審査請求 未請求 請求項の数22 O L (全 20 頁)

(21) 出願番号 特願平5-217202

(22) 出願日 平成5年(1993)9月1日

(71) 出願人 000005108

株式会社日立製作所

東京都千代田区神田駿河台四丁目6番地

(72) 発明者 岩田 尚史

神奈川県横浜市戸塚区吉田町292番地株式
会社日立製作所生産技術研究所内

(72) 発明者 相場 良彦

神奈川県横浜市戸塚区吉田町292番地株式
会社日立製作所生産技術研究所内

(72) 発明者 永塚 俊治

神奈川県横浜市戸塚区吉田町292番地株式
会社日立製作所生産技術研究所内

(74) 代理人 弁理士 小川 勝男

最終頁に続く

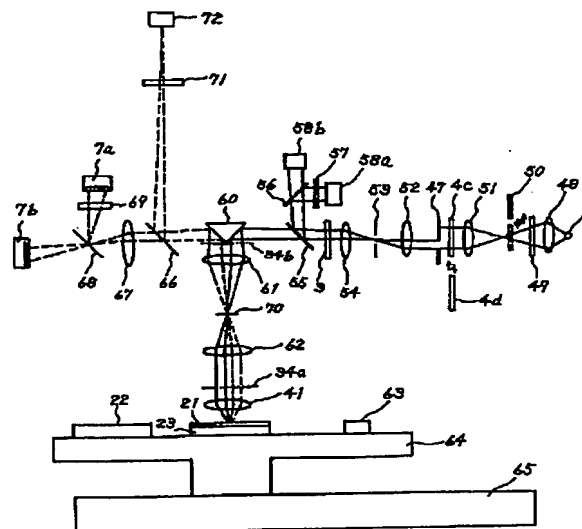
(54) 【発明の名称】 薄膜特性値測定方法及び装置

(57) 【要約】 (修正有)

【目的】 感光性薄膜の膜厚及び、感光波長における屈折率と吸収係数を測定する。

【構成】 光源1はフィルタ4cにより、被測定膜21の感光波長域の単色光と非感光波長域の光を含んだ照明光になる。遮光板47により光軸付近を通過させず対物レンズ41に入射した照明光は、収束光となり被測定膜21を照射する。反射光は対物レンズ41の後焦点面34a上に等傾角干渉縞を生じ、感光波長での干渉縞はリニアセンサ7bで検出され、リニアセンサ7bは単色光フィルタ69を介することで非感光波長での干渉縞を検出する。屈折率と吸収係数が既知の参照試料22も同様に検出する。

図 1



【特許請求の範囲】

【請求項 1】 薄膜試料の等傾角干渉縞から薄膜特性値を測定する方法において、薄膜試料の等傾角干渉縞の強度分布検出値と、測定波長における屈折率と吸収係数が既知の参照試料の等傾角干渉縞の強度分布検出値と、該参照試料の測定波長における入射角依存強度反射率特性の理論計算値より、該薄膜試料の入射角依存強度反射率特性を算出し、薄膜の膜厚、屈折率、吸収係数を測定することを特徴とする薄膜特性値測定方法。

【請求項 2】 請求項 1 に記載の薄膜特性値測定方法において、薄膜試料の入射角依存強度反射率特性と、任意の膜厚、屈折率、吸収係数の組を代入して理論計算した入射角依存強度反射率特性を比較し、両者が最も一致する場合の、膜厚、屈折率、吸収係数の組を測定結果として出力することを特徴とする薄膜特性値測定方法。

【請求項 3】 請求項 1 に記載の薄膜特性値測定方法において、試料を退避したときの等傾角干渉縞観測面での強度分布検出値を用いて、該薄膜試料の入射角依存強度反射率特性を算出することを特徴とする薄膜特性値測定方法。

【請求項 4】 請求項 1 に記載の薄膜特性値測定方法において、等傾角干渉縞の強度分布を複数回の検出し、その平均値を等傾角干渉縞の強度分布検出値とすることを特徴とする薄膜特性値測定方法。

【請求項 5】 請求項 1 に記載の薄膜特性値測定方法において、照明光量検出値を用いて、薄膜試料と参照試料の等傾角干渉縞の強度分布検出値を各々補正した後、該薄膜試料の入射角依存強度反射率特性を算出することを特徴とする薄膜特性値測定方法。

【請求項 6】 請求項 1 に記載の薄膜特性値測定方法において、薄膜試料の吸収係数が小さい波長における等傾角干渉縞の強度分布検出値から膜厚を求め、該膜厚値及び薄膜試料の吸収係数が大きい波長における等傾角干渉縞の強度分布検出値から屈折率、吸収係数を測定することを特徴とする薄膜特性値測定方法。

【請求項 7】 請求項 6 に記載の薄膜特性値測定方法において、薄膜試料の吸収係数が小さい波長と吸収係数が大きい波長における等傾角干渉縞の強度分布検出値を同時に検出することを特徴とする薄膜特性値測定方法。

【請求項 8】 請求項 1 に記載の薄膜特性値測定方法において、感光性薄膜試料の非感光波長における等傾角干渉縞の強度分布検出値から膜厚を求め、該膜厚値及び感光性薄膜試料の感光波長における等傾角干渉縞の強度分布検出値から屈折率、吸収係数を測定することを特徴とする薄膜特性値測定方法。

【請求項 9】 請求項 8 に記載の薄膜特性値測定方法において、感光性薄膜試料の非感光波長と感光波長における等傾角干渉縞の強度分布検出値を同時に検出することを特徴とする薄膜特性値測定方法。

【請求項 10】 請求項 1 に記載の薄膜特性値測定方法に

2

において、感光性薄膜試料を感光波長の光で十分露光して吸収係数が小さくなった時の等傾角干渉縞の強度分布検出値から該感光性薄膜試料の膜厚を求め、該膜厚値及び露光開始時の該感光性薄膜試料の等傾角干渉縞の強度分布検出値を用いて、露光開始時の該感光性薄膜試料の膜厚と感光波長における屈折率と吸収係数を測定することを特徴とする薄膜特性値測定方法。

【請求項 11】 請求項 1 に記載の薄膜特性値測定方法において、光軸が薄膜試料に垂直な対物レンズを用い、ほぼ垂直方向からの照明光を含まない収束光で薄膜試料を照明し、薄膜試料の等傾角干渉縞の強度分布を検出することを特徴とする薄膜特性値測定方法。

【請求項 12】 請求項 11 に記載の薄膜特性値測定方法において、対物レンズの後焦点面上で照明光と薄膜試料からの反射光が同一位置を通過することなく薄膜試料の等傾角干渉縞の強度分布を検出することを特徴とする薄膜特性値測定方法。

【請求項 13】 薄膜試料の等傾角干渉縞から薄膜特性値を測定する方法において、薄膜試料の吸収係数の小さい波長における等傾角干渉縞の強度分布検出値から膜厚を求め、該膜厚値及び薄膜の吸収係数が大きい波長における等傾角干渉縞の強度分布検出値から屈折率、吸収係数を測定することを特徴とする薄膜特性値測定方法。

【請求項 14】 請求項 13 に記載の薄膜特性値測定方法において、薄膜試料の吸収係数が小さい波長と吸収係数が大きい波長における等傾角干渉縞の強度分布検出値を同時に検出することを特徴とする薄膜特性値測定方法。

【請求項 15】 薄膜試料の等傾角干渉縞から薄膜特性値を測定する方法において、感光性薄膜試料の非感光波長における等傾角干渉縞の強度分布検出値から膜厚を求め、該膜厚値及び感光性薄膜試料の感光波長における等傾角干渉縞の強度分布検出値から屈折率、吸収係数を測定することを特徴とする薄膜特性値測定方法。

【請求項 16】 請求項 15 に記載の薄膜特性値測定方法において、感光性薄膜試料の感光波長と非感光波長の等傾角干渉縞の強度分布検出値を同時に検出することを特徴とする薄膜特性値測定方法。

【請求項 17】 光源と、波長を限定する光学素子と、偏光素子と、試料に収束光を照射するため照明用レンズと、試料から反射する発散光をとらえる検出用レンズと、該検出用レンズの後焦点面上の強度分布を検出する装置を有する薄膜特性値測定装置であって、薄膜試料の後焦点面強度分布検出値と、屈折率と吸収係数が既知の参照試料の後焦点面強度分布検出値と、参照試料の入射角依存強度反射率特性の理論計算値から薄膜試料の入射角依存強度反射率特性を算出する装置と、該入射角依存強度反射率特性から薄膜の膜厚、屈折率、吸収係数を決定する装置を備えたことを特徴とする薄膜特性値測定装置。

【請求項 18】 請求項 17 に記載の薄膜特性値測定装置

において、照明用レンズと検出用レンズを光軸が薄膜試料に垂直な一つの対物レンズで兼用し、かつば垂直方向からの照明光を含まない収束光で薄膜試料を照明する光学系にしたことを特徴とする薄膜特性値測定装置。

【請求項19】請求項18に記載の薄膜特性値測定装置において、対物レンズの後焦点面上で照明光と薄膜試料からの反射光が同一位置を通過しない光学系にしたことを特徴とする薄膜特性値測定装置。

【請求項20】請求項17に記載の薄膜特性値測定装置において、薄膜試料の吸収係数が小さい波長と大きい波長に照明波長を限定する光学素子を備えたことを特徴とする薄膜特性値測定装置。

【請求項21】請求項17に記載の薄膜特性値測定装置において、薄膜試料の吸収係数が小さい波長と大きい波長における等傾角干渉縞の強度分布を同時に検出する光学系にしたことを特徴とする薄膜特性値測定装置。

【請求項22】請求項17に記載の薄膜特性値測定装置において、薄膜参照試料を同時に載置台に搭載できる構成にしたことを特徴とする薄膜特性値測定装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【産業上の利用分野】本発明は、薄膜の膜厚、屈折率、吸収係数の測定方法および装置に関する。

【0002】

【従来の技術】薄膜特性値（膜厚、屈折率、吸収係数）を光学的に測定する従来技術には、偏光解析法と入射角依存反射特性解析法がある。いずれもレジスト膜に入射した光が、空気と薄膜の境界面および薄膜の基板の境界面で繰返し反射し干渉する物理現象に基づき、各特性値を求めるものである。

【0003】偏光解析法（例えば田幸敏治他編、「光学的測定ハンドブック」、pp256-265、朝倉書店（1981））は、斜めから光を照射し、P偏光成分とS偏光成分の反射強度と位相差から膜特性値を計算で求める。偏光解析法で被測定膜の膜厚、屈折率、吸収係数の3つの未知量を求めるには、2つ以上の入射角で偏光解析を行う必要があるため、装置が複雑となり高速には測定できない。また測定感度は入射角に依存するため、被測定膜が未知の場合には、入射角を変えた測定を繰返さなければ高精度に測定出来ない。

【0004】入射角依存反射特性解析法は、入射角を変化させたときの反射強度の変化から各特性値を求める方法である。特開平2-128106号は、光学系全体を機械的に走査して3つの入射角での強度反射率から膜厚、屈折率、吸収係数を測定する方法を開示している。しかし機械的に走査して反射光を検出する方式であるため高速には測定できない。また高精度に測定するには反射率の検出精度を十分高くする必要があり、複雑で高価な測定装置が必要になる。

【0005】入射角依存反射特性を高速、安定に検出

する方法として、等傾角干渉（マックス・ボルン他著、「光学の原理II」、pp454-456、東海大学出版会）と呼ばれる光学現象を利用したものがある。適当な入射角範囲にわたる収束光で被測定膜を照明し、反射光を検出用レンズに通過させると、検出用レンズの後焦点面には干渉縞が生じる。これは等傾角干渉縞と呼ばれ、その強度は入射角依存反射特性に対応している。そこで等傾角干渉縞の強度分布をアレイセンサで撮像すれば、可動部を用いずに入射角依存反射特性を検出でき、膜厚や屈折率を求められる。特公昭62-49562号、特開昭64-75902号、特開平4-313006号は、照明用と検出用の対向する2つのレンズを用いた光学系により等傾角干渉縞を検出し、干渉縞強度が極値となる入射角から膜厚と屈折率を求める方法を開示している。

【0006】また特開平3-17505号では、光軸が被測定膜に垂直な一つのレンズに照明光と反射光を通過させ、同心円状に生じる等傾角干渉縞から膜厚と屈折率を測定する方法を開示している。この方式では高NAレンズを用いることで収束光を絞り込み、非常に小さな領域の膜厚と屈折率の測定を可能にしている。しかし上記した等傾角干渉縞を用いた従来技術はいずれも、吸収のある薄膜、すなわち吸収係数が0でない薄膜の測定については詳しく言及されていない。

【0007】

【発明が解決しようとする課題】本発明は、等傾角干渉縞を検出することにより、薄膜の膜厚と屈折率だけでなく、吸収係数も高速、安定に測定する装置を提供するものである。

【0008】本発明の目的は、吸収性のある薄膜の膜厚と特定波長における屈折率と吸収係数を測定する方法を提供することにある。

【0009】本発明の他の目的は、吸収性のある薄膜の膜厚と特定波長における屈折率と吸収係数を測定するために、迷光を含まずに等傾角干渉縞の強度分布を正確に検出できる光学系を提供することにある。

【0010】本発明の他の目的は、ホトレジスト等の感光性薄膜の膜厚及び、感光波長における屈折率と吸収係数の測定方法を提供することにある。

【0011】

【課題を解決するための手段】薄膜の吸収係数を求めるには、絶対値が正確な入射角依存強度反射率を測定する必要がある。しかし被測定膜の等傾角干渉縞強度分布、すなわち入射角依存反射光強度分布 $I(\theta)$ は、照明光強度分布 $S(\theta)$ と入射角依存強度反射率 $R(\theta)$ の積になり、 $I(\theta)$ は $R(\theta)$ に一致しない。そこで本発明では照明光強度分布 $S(\theta)$ の影響を除去するため、測定波長での屈折率と吸収係数が既知の参照用鏡面試料の入射角依存反射光強度分布 $I_{ref}(\theta)$ を検出し、さらに参照用鏡面試料の測定波長での屈折率と吸収係数から入射角依存

強度反射率 $R_{ref}(\theta)$ を理論計算する。そして被測定膜の入射角依存反射光強度分布 $I(\theta)$ を参照用鏡面試料の入射角依存反射光強度分布 $I_{ref}(\theta)$ で割算し、これに参照用鏡面試料の入射角依存強度反射率 $R_{ref}(\theta)$ を乗ずることで、被測定膜の入射角依存強度反射率 $R(\theta)$ を求める。

【0012】また光軸が被測定膜に垂直な一つのレンズに照明光と反射光を通過させて等傾角干渉縞を検出する光学系を用いる場合には、レンズの光軸付近を通過する照明光を遮るための遮光板を照明光学系に挿入する。これにより迷光の影響を受けずに、等傾角干渉縞の強度分布を正確に検出する。

【0013】感光性薄膜の膜厚と、感光波長における屈折率と吸収係数を精度良く測定するには、感光波長での測定だけでなく非感光波長での測定も行う。まず非感光波長で等傾角干渉縞を検出し、膜厚と非感光波長における屈折率と吸収係数を求める。ここで求めた膜厚を既知の値として、次に感光波長で等傾角干渉縞を検出し、感光波長における屈折率と吸収係数を求める。

【0014】

【作用】参照用鏡面試料の入射角依存反射光強度分布 $I_{ref}(\theta)$ は、照明光強度分布 $S(\theta)$ と入射角依存強度反射率 $R_{ref}(\theta)$ の積になる。このため被測定膜の入射角依存反射光強度分布 $I(\theta)$ を参照用鏡面試料の入射角依存反射光強度分布 $I_{ref}(\theta)$ で割算すれば、照明光強度分布 $S(\theta)$ を消去でき、 $R(\theta)/R_{ref}(\theta)$ となる。これに参照用鏡面試料の入射角依存強度反射率 $R_{ref}(\theta)$ の理論計算値を乗ずることで、被測定膜の入射角依存強度反射率 $R(\theta)$ が求まる。

【0015】レンズの光軸付近では、レンズ表面が光軸にほぼ垂直である。このため光軸が被測定膜に垂直なレンズを用いた等傾角干渉縞検出光学系では、レンズ表面で反射した光が迷光として検出されてしまう。しかし照明光学系に遮光板を挿入し、光軸付近を通過する照明光を遮れば迷光は生じず、等傾角干渉縞の強度分布を正確に検出できる。

【0016】感光性薄膜は、感光波長域の吸収係数が大きく、非感光波長域では吸収係数がほぼ0である。測定*

$$R = \left| \frac{r'}{r} \right|^2$$

$$= r' \cdot r'^* \quad *$$

【0022】ここで r' は、薄膜の振幅(複素)反射率であり、 r'^* は r' の共役複素数である。変数を以下のように定義すると、 r' は(数2)～(数8)で表される。

【0023】 r_{01}' : 空気と薄膜21の境界面24での振幅(複素)反射率

r_{12}' : 薄膜21と基板23との境界面25での振幅(複素)反射率

δ' : 薄膜内での一往復で生じる光路差

λ : 照明光の波長

*光が感光波長の光の場合は、被測定膜に吸収性があるため、膜中を通過する間に振幅が減衰する。このため被測定膜を通過する光の振幅が、被測定膜の表面で反射した光に比べ小さくなり、等傾角干渉縞のコントラストが低下する。この干渉縞は膜厚に関する情報を多く持っていないため、膜厚、屈折率、吸収係数の3つの未知数を同時に精度良く求められない。

【0017】一方、非感光波長の測定光にすれば、被測定膜での吸収がなく膜内で振幅が減衰しない。このため膜厚に関する情報を十分含んだ良好なコントラストの等傾角干渉縞を検出できる。そこで非感光波長の干渉縞から、感光性薄膜の膜厚と非感光波長における屈折率と吸収係数をまず求める。ここで求めた膜厚を既知の値とすれば、感光波長での干渉縞から感光波長における屈折率と吸収係数を求めることができる。

【0018】

【実施例】以下本発明の実施例を説明する。まず本発明に関連する光学的な現象と、薄膜特性値(膜厚 d 、屈折率 n 、吸収係数 k)測定法の原理を説明する。なお薄膜とは、図4に示すように、基板23上の薄膜21であり、空気と薄膜21の境界面24と、薄膜21と基板23の境界面25は平行であるとする。

【0019】薄膜21に入射角 θ で照明光32が入射すると、境界面24での反射と透過および、境界面25での反射を繰り返す。2つの境界面は平行なため、薄膜から反射された光は、同図に示すような平行光束33となる。この平行光束をレンズ6に通過させると、レンズの後焦点面34上の1点Pに集光し干渉する。P点の位置と干渉強度は入射角により変化するため、後焦点面34上には明暗の縞が生じ、これは等傾角干渉縞と呼ばれる。等傾角干渉縞は、入射角に依存した薄膜の強度反射率に対応しているため、この干渉縞を観測することで、薄膜の膜厚、屈折率、吸収係数を測定する。

【0020】薄膜の強度反射率 R は、以下の式で理論計算される。なお添字'は複素数を示し、 i は虚数単位の記号である。

【0021】

【数1】

..... (数1)

d : 薄膜の膜厚

n_0 : 空気の屈折率(=1)

n' : 薄膜の複素屈折率。 $n' = n - i k$

n_2' : 基板の複素屈折率。 $n_2' = n_2 - i k_2$

n_2 : 波長 λ における基板の屈折率

k_2 : 波長 λ における基板の吸収係数

θ : 入射角

θ_1' : 薄膜内での屈折角

50 θ_2' : 基板内での屈折角

$$r' = \frac{r_{s,1}' + r_{s,2}' \exp(-i\delta')}{1 + r_{s,1}' r_{s,2}' \exp(-i\delta')} \quad \text{【数2】} \quad \dots\dots (\text{数2})$$

$$\delta' = \frac{2\pi}{\lambda} 2n'd \cos \theta_1' \quad \text{【数3】} \quad \dots\dots (\text{数3})$$

$$n_0 \sin \theta = n' \sin \theta_1' = n_s \sin \theta_s' \quad (\text{スネルの法則}) \quad \text{【数4】} \quad \dots\dots (\text{数4})$$

【0027】また境界面での振幅反射率はフレネルの式 * 【0028】
で計算でき、照明光32がP偏光の場合、 * 【数5】

$$r_{s,1}' = \frac{n' \cos \theta - n_s \cos \theta_1'}{n' \cos \theta + n_s \cos \theta_1'} \quad \dots\dots (\text{数5})$$

$$r_{s,2}' = \frac{n_s' \cos \theta_1' - n' \cos \theta_s'}{n_s' \cos \theta_1' + n' \cos \theta_s'} \quad \text{【数6】} \quad \dots\dots (\text{数6})$$

【0030】となり、照明光がS偏光の場合には、 20 ※ 【数7】
【0031】 ※

$$r_{s,1}' = \frac{n_s \cos \theta - n' \cos \theta_1'}{n_s \cos \theta + n' \cos \theta_1'} \quad \dots\dots (\text{数7})$$

$$r_{s,2}' = \frac{n' \cos \theta_1' - n_s' \cos \theta_s'}{n' \cos \theta_1' + n_s' \cos \theta_s'} \quad \text{【数8】} \quad \dots\dots (\text{数8})$$

【0033】となる。すなわち薄膜の強度反射率の理論値Rthは、 $Rth(n_0, d, n, k, n_2, k_2, \theta, \lambda)$ という関数で表現できる。

【0034】図5は、鏡面シリコン基板上の薄膜を、波長365nmのP偏光光で照明したときの、入射角 θ に依存した強度反射率Rの変化を理論計算した例である。膜厚d、屈折率n、吸収係数kの組み合わせにより、強度反射率Rの変化が異なることがわかる。吸収係数kが増加すると、薄膜内で光エネルギーが吸収されるため、強度反射率Rが低下する傾向がある。また吸収係数kが異なると、境界面での位相変化量が違うため、入射角依存反射率が極値となる入射角も移動する。すなわち反射率★40

$$M(d, n, k) = \sum_i |Rth(\theta_i, d, n, k) - R(\theta_i)| \quad \dots\dots (\text{数9})$$

$$M(d, n, k) = \sum_i \{Rth(\theta_i, d, n, k) - R(\theta_i)\}^2 \quad \text{【数10】} \quad \dots\dots (\text{数10})$$

【0038】ここで照明光はP偏光もしくはS偏光の直線偏光でその偏光方向も既知とする。また空気屈折率 n_0 、波長 λ 、波長 λ における基板の屈折率 n_2 と吸収係数 k_2 も既知とし、これらは変数から除外してある。関数 $M(d, n, k)$ は、実測反射率 $R(\theta)$ と理論反射率 Rth

★の極値となる入射角に着目した方法では、吸収のある薄膜の特性値を測定できない。吸収のある薄膜の特性値を測定するには、反射率の絶対値を用いる必要がある。

【0035】入射角依存強度反射率の絶対値から薄膜特性値を測定するには、被測定膜の入射角依存強度反射率 $R(\theta)$ を実測し、 $R(\theta)$ と一致する理論反射率 $Rth(n_0, d, n, k, n_2, k_2, \theta, \lambda)$ を探し出せばよい。これには以下に示す(数9)もしくは(数10)のいずれかの演算を行う。

【0036】

【数9】

(θ, d, n, k)の一致度を示す評価関数であり、(数9)では複数の入射角での差の絶対値の総和、(数10)では差の自乗の総和を演算するものである。そして評価関数 M が最小な場合、実測反射率 $R(\theta)$ と理論反射率 Rth (θ, d, n, k)が最も一致し、このときの d, n, k の

9

組を、波長 λ における被測定膜の測定値とすればよい。

【0039】上記方式において、測定分解能の向上と計算量の低減を両立する実施例を説明する。被測定膜で可能性のある膜厚 d 、屈折率 n 、吸収係数 k の最大、最小をmax、minの添字で示し、測定分解能を d_r 、 n_r 、 k_r *

$$C_1 = \frac{d_{\max} - d_{\min}}{d_r} \times \frac{n_{\max} - n_{\min}}{n_r} \times \frac{k_{\max} - k_{\min}}{k_r} \\ = N_d \cdot N_n \cdot N_k$$

【0041】となる。ただし、 N_d 、 N_n 、 N_k は各特性値の分解点数である。 d_r 、 n_r 、 k_r を小さくし高分解能で計算すると、各分解点数が増加し、計算回数 C_1 は非常に膨大になる。そこで分解能を逐次向上させ計算量を低減する。すなわち第1段階では測定分解能 d_r 、 n_r 、 k_r をある程度大きくして粗検出を行い、膜厚 d_1 、屈折率 n_1 、吸収係数 k_1 を求める。第2段階では被測定膜の測定範囲を $d_1 \pm \Delta d_1$ 、 $n_1 \pm \Delta n_1$ 、 $k_1 \pm \Delta k_1$ に限定するとともに測定分解能を小さくして膜厚 d_2 、屈折率 n_2 、吸収係数 k_2 を探索する。以降、被測定膜の測定範囲と測定分解能をともに逐次小さくすることで、必要な測定分解能に達するまでこの操作を繰り返す。

【0042】これにより、膨大な計算を行わずに測定分解能を向上できる。また第1段階での測定分解能が粗すぎると正しい結果に収束しないことがある。これを防止するには、第1段階の粗検出では評価関数 M を最小な場合を探すだけでなく、例えば最小値の2倍以下を満足する場合などの条件とし、複数の d 、 n 、 k の組合わせを出力する。そして各粗検出結果に対して前記した第2段階以降の処理を行い、最終的には評価関数 M を最小とする d 、 n 、 k の組合わせを求めればよい。

【0043】この方法での薄膜の膜厚 d 、屈折率 n 、吸収係数 k の測定を行うには、実測する被測定膜の入射角依存強度反射率 $R(\theta)$ の絶対値を正確に測定する必要がある。 $R(\theta)$ を安定、高速に測定し、薄膜特性値を求める本発明の一実施例を図6を用いて説明する。

【0044】図6は薄膜の入射角依存強度反射率 $R(\theta)$ を測定し、薄膜の特性値を求める装置である。本測定装置は光源1、コリメート用レンズ2、偏光素子3、単色光透過フィルタ4、集光用の照明側レンズ5、検出側レンズ6、検出側レンズ6の後焦点面34上で入射面内方※

$$x = f \sin \theta_p$$

【0048】という関係がある。(数12)の正弦条件は、レンズが良好な結像性能を有するために必要な条件であり、顕微鏡対物レンズはこの条件を満足するように設計されている。つまり検出側レンズ6には顕微鏡対物★

$$x = f \sin (\theta - \theta_d)$$

【0050】となる。そこでリニアセンサ7で検出した検出側レンズ6の後焦点面34上の反射光強度分布 I

10

*とすると、膜厚、屈折率、吸収係数の3つの未知数を決定するために必要な(数9)もしくは(数10)の計算回数 C_1 は、

【0040】

【数11】

$$\frac{k_{\max} - k_{\min}}{k_r}$$

…… (数11)

※向の強度分布を検出する光量蓄積型のリニアセンサ7、被測定膜の反射光強度分布を記憶する被測定膜メモリ8、参照試料の反射光強度分布を記憶する参照試料メモリ9、センサの暗レベルを記憶する暗レベルメモリ12、被測定膜の入射角依存強度反射率を求める反射率演算部10、(数9)もしくは(数10)の評価関数 M を用いて薄膜特性値を求める特性値決定部11からなる。なお照明側レンズ5と検出側レンズ6の光軸が試料面に入射する角度はともに θ_d とする。

20 【0045】光源1をでた光は、コリメート用レンズ2により平行光となり、偏光板3と単色光透過フィルタ4を通過し、直線偏光の単色光となる。ここでは紙面に平行なP偏光とする。P偏光単色光は照明側レンズ5により収束され、試料を照明する。まず基板23上の被測定膜21の反射光強度分布を測定する。ここで入射角 θ_a の照明光線32aは薄膜内で繰返し反射し、反射角 θ_a の平行光束33aとして反射される。図6では簡単のため2本の光線のみ記載した。平行光束33aは検出側レンズ6を通過するとレンズの性質により、検出側レンズ6の後焦点面34上の点P aに集光する。同様に入射角 θ_b の照明光線32bは、後焦点面34上の点P bに集光する。この様に光線の入射角 θ と後焦点面34上の集光位置は1対1の関係があり、後焦点面上の反射光強度分布は入射角依存反射光強度特性に対応する。

【0046】いま検出側レンズ6が、よく収差補正され正弦条件が成立したレンズであり、その焦点距離を f とする。この場合、図7に示すように、検出側レンズ6の光軸36から集光点Pまでの距離 x と、光軸36と平行光束33のなす角 θ_p には、

40 【0047】

【数12】

…… (数12)

★レンズを用いれば良い。また $\theta_p = \theta - \theta_d$ であるため、

【0049】

【数13】

…… (数13)

(x)を、(数13)により変数変換すれば、入射角依存反射光強度特性 $I(\theta)$ が求まる。しかし光源1に水銀ラ

12

... (数14)

【数15】

$$\frac{I(\theta)}{I_{\text{ref}}(\theta)} = \frac{R(\theta)}{R_{\text{ref}}(\theta)} \quad \dots\dots (\text{数16})$$

【数17】

$$\begin{aligned} R_{r,r}(\theta) &= |r_{r,r}'(\theta)|^2 \\ &= r_{r,r}'(\theta) \cdot r_{r,r}'(\theta)^* \end{aligned} \quad \dots\dots (\text{数}17)$$
$$r_{ref'}(\theta) = \frac{n_{ref'} \cos \theta - n_o \cos \theta_{ref'}}{n_{ref'} \cos \theta + n_o \cos \theta_{ref'}} \quad (\text{P 偏光の場合}) \dots\dots (数 18)$$
$$r_{rr'}(\theta) = \frac{n_o \cos \theta - n_{ref'} \cos \theta_{ref'}}{n_o \cos \theta + n_{ref'} \cos \theta_{ref'}} \quad (\text{S 偏光の場合}) \cdots \cdots (\text{数 } 19)$$
$$n \sin \theta = n' \sin \theta' \quad (\text{スネルの法則}) \dots\dots (\text{数} 20)$$

【数 2 1】

 n_{ref} : 測定波長 λ における基板の屈折率

$$\{1(\theta) / I_{r,r}(\theta)\} \times R_{r,r}(\theta) = R(\theta) \quad \cdots \cdots \text{(数21)}$$

13

【0065】となり、 $R(\theta)$ が求まる。すなわち、被測定膜21の入射角依存反射光強度特性測定値 $I(\theta)$ を参照試料22の入射角依存反射光強度特性測定値 $I_{ref}(\theta)$ で割り、参照試料22の入射角依存強度反射率の理論計算値 $R_{ref}(\theta)$ を乗ずることにより、被測定膜の入射角依存強度反射率 $R(\theta)$ を求めることができる。図8は、以上の処理の概要を示したものである。

$$I(\theta) = S(\theta) \cdot T(\theta) \cdot R(\theta) \quad \dots\dots (数22)$$

【0068】

$$I_{ref}(\theta) = S(\theta) \cdot T(\theta) \cdot R_{ref}(\theta) \quad \dots\dots (数23)$$

【0069】この場合も(数21)の演算を行なえば、 $S(\theta)$ と同様に $T(\theta)$ も消去できる。

【0070】図6の反射率演算部10では、以上の処理により、被測定膜の入射角依存強度反射率 $R(\theta)$ を求める。そして特性値決定部11で被測定膜の膜厚 d 、屈折率 n 、吸収係数 k を求める。

【0071】本実施例によれば、照明光強度分布 $S(\theta)$ が均一でなくても、安定、高速に被測定膜の入射角依存特性強度反射率 $R(\theta)$ を求めることができ、膜特性値を求めることができる。このため種々の光源を薄膜特性値測定に用いることが可能になり、照明光学系の調整も容易になる。また各光学素子の透過位置の違いによる透過※

$$\frac{I(\theta) - I_b(\theta)}{I_{ref}(\theta) - I_b(\theta)} \times R_{ref}(\theta) = R(\theta) \quad \dots\dots (数24)$$

【0074】暗レベル補正により、リニアセンサ7の各検出素子毎の暗レベルのばらつきを補正できる。これにより被測定膜の入射角依存強度反射率 $R(\theta)$ が高精度に求まり、膜特性値の測定精度を向上できる。

【0075】本実施例の測定手順を図9に示す。同図(a)に示すように、載置台64に被測定膜を形成した基板23と参照試料22を搭載し、以下の手順で測定する。

【0076】手順1：(1)載置台64を退避し、リニアセンサ7の暗レベル強度分布 $I_b(x)$ を検出する。(同図(b))

手順2：参照試料を測定位置に移動し、後焦点面反射光強度分布 $I_{ref}(x)$ を検出する。(同図(c))

手順3：被測定膜基板23を測定位置に移動し、後焦点面反射光強度分布 $I(x)$ を検出する。(同図(d))

手順4：各検出信号を(数13)で変数変換し、 $I(\theta)$ 、 $I_{ref}(\theta)$ 、 $I_b(\theta)$ を求める。

【0077】手順5：(数24)で、被測定膜の入射角依存強度反射率 $R(\theta)$ を計算する。

【0078】手順6：(数9)もしくは(数10)の演算を行い、膜特性値を決定する。

【0079】この手順で測定すれば、経時変化的な光源の光量低下が徐々に生じたとしても、 $R(\theta)$ を正確に求められ、常に膜特性値を高精度に測定できる。また被測

14

*【0066】照明用レンズ5や検出用レンズ6などの光束通過位置による透過率分布など、光学系中の光学素子の不均一性を入射角 θ の関数と考えて $T(\theta)$ とおけば、(数14)、(数15)は次式で表される。

【0067】

【数22】

【数23】

※率の不均一性 $T(\theta)$ の補正も行なわれるため、光学素子の製造精度も緩和できる利点がある。

【0072】被測定膜の入射角依存強度反射率 $R(\theta)$ をさらに精度よく求めるには、暗レベル補正を行えば良い。これには照明光32が集光する位置から試料を退避させ、このときのリニアセンサ7の出力を、暗レベル強度分布 $I_b(x)$ とし、図6に示す暗レベルメモリ12に記憶する。これを(数13)により変数変換し $I_b(\theta)$ を求め、次式により $R(\theta)$ を求める。

【0073】

【数24】

定膜基板23と参照試料22を交換することなく、効率良く測定できる。もちろん被測定膜基板23と参照試料22を人手により交換してもよい。同一基板上の多点測定のような短時間の測定では、 $I_{ref}(x)$ と $I_b(\theta)$ を初めに測定してメモリに記憶し、被測定膜の反射光強度分布 $I(x)$ を測定するたびに読み出すようにすれば、さらに効率的に測定できる。

【0080】測定精度を向上する他の実施例を図10に示す。本実施例では加算平均部13により、被測定膜21の後焦点面反射光強度分布 $I(x)$ をリニアセンサ7で複数回検出し、それらの平均を被測定膜メモリ8に記憶する。平均化効果でリニアセンサ7の駆動用電気回路で重畳された白色ノイズ成分を低減できるため、 S/N 比が向上し、各特性値の測定精度を向上できる。もちろん参照試料の反射光強度分布と暗レベルも同様に検出した方が、測定精度は向上する。

【0081】また光源自体の光量変動を補正して測定する実施例を図11で説明する。本実施例は光量変動補正部80、光電変換型の光量検出器58、光量検出器58に照明光を導くハーフミラー55を図6の実施例に付加したものである。図12に光量補正の原理を示す。(a)はリニアセンサ7の走査周期信号 ϕ 、(b)はリニアセンサ7の出力信号、(c)は光量検出器58の出力信号、(d)は光量検出器58の出力信号をリニアセンサ7の走

査周期時間分だけ積分した信号である。

【0082】リニアセンサ7は、周期 T_n の期間に各画素に照射された光エネルギーを蓄積し、次の周期に信号 W_n を出力する。このため(c)に示すように光量変動があると、蓄積される光エネルギーも変動し、 W_n は一定にならない。そこで(d)に示すように光量検出器58の出力を走査周期時間分だけ積分した出力を、走査周期信号 ϕ に同期してサンプリングし、補正值 C_n を得る。補正值 C_n は周期 T_n の総光量に対応するので、信号 W_n を補正值 C_n で割算すれば、光量変動に伴う出力信号 W_n の変動を補正できる。

【0083】図13は上記補正を行う光量変動補正部80の実施例である。同図(a)はA/D変換器83、積分回路81、サンプル・ホールド回路84、A/D変換器85、デジタル割算器86からなる。同図(b)は、積分回路81、サンプル・ホールド回路84、アナログ割算器87、A/D変換器88からなる。積分回路81はリニアセンサ7の一走査周期時間だけ、リニアセンサ7の出力信号をアナログ積分するもので、サンプル・ホールド回路84は走査周期信号 ϕ に同期して積分回路81の出力信号をサンプリングし、補正值 C_n を出力する。

(a)はリニアセンサ7の出力信号 W_n と補正值 C_n をA/D変換した後、デジタル信号で割算を実行する。(b)はリニアセンサ7の出力信号 W_n と補正值 C_n をアナログ信号で割算してからA/D変換するものである。

【0084】以上のようにリニアセンサ7の出力信号を補正しながら、暗レベル強度分布 $I_b(x)$ 、参照試料の反射光強度分布 $I_{ref}(x)$ 、被測定膜基板23の反射光強度分布 $I(x)$ を検出すれば、光量変動の影響を低減できるため、被測定膜の入射角依存強度反射率 $R(\theta)$ が高精度に求まる。これにより被測定膜の特性値の測定精度が向上する。

【0085】以下、本発明の他の実施例を説明する。本実施例は感光性薄膜の膜厚 d 、屈折率 n 、吸収係数 k を精度よく求めるものである。膜厚 d は立体的な寸法であり波長に依存する値ではないが、屈折率 n と吸収係数 k は膜材料の物性値であり波長により値が違ふ。特に感光性薄膜の露光波長での屈折率 n と吸収係数 k の値は工業上重要な意味を持つ。

【0086】例えば半導体製造業では、感光性材料の一種であるホトレジストを用い、原版パターンをウェーハ表面に塗布したホトレジスト膜に転写し、微細回路パターンを形成する。製造工程では転写を安定に行うため、膜厚測定による工程管理が通常行っている。しかし転写条件は膜厚だけでなく、露光波長での屈折率 n と吸収係数 k にも依存する。

【0087】図14(a)は、ホトレジストの吸収係数の分光特性を示し、実線は露光前、破線は露光後の特性である。吸収係数がほぼ0である波長域は非感光波長域であり、波長 λ_a の光を照射しても、ホトレジスト膜は光

エネルギーを吸収せず、化学的な組成は変化しない。つまり波長 λ_a の光では、ホトレジストは感光しない。そこで半導体工場の露光ラインでは、非感光波長域の黄色光で室内照明を行い、不要な露光を防いでいる。一方、露光前に吸収係数が大きい波長域はホトレジストの感光波長域であり、感光波長域の波長 λ_b の光を照射しホトレジスト膜を露光すると、光エネルギーを吸収して組成が変わり、同図に示すように吸収係数が低下する。つまりパターン転写とは、感光波長域の光でホトレジスト膜の所定の領域を露光して吸収係数を低下させ、露光されずに元の吸収係数を保った領域との化学的な組成の違いで、原版パターンをレジスト膜に転写する作業といえる。

【0088】パターン転写の安定化の一環として、露光装置では一定の光エネルギーを照射するような制御が行われている。しかしこの制御では、露光前のホトレジストの吸収係数の値が異なれば、露光後の吸収係数（すなわちホトレジスト膜の化学的な組成）が変動し、これがパターン寸法誤差の要因となる。同様に、露光波長における屈折率の変動も誤差要因となる。従ってパターン転写工程では、ホトレジスト膜の露光波長における屈折率と吸収係数を、露光前に測定し管理することが重要である。

【0089】しかし感光性薄膜の膜厚と露光波長における屈折率と吸収係数を測定するには、次に述べるような難しさがある。図14(b)に示すように、測定光32を感光性の被測定膜21に照射すると、膜表面で反射する被測定膜反射光33cと、被測定膜内に入射し基板23との境界面で反射してから射出する被測定膜通過光33dに分かれる。本発明の薄膜特性値測定法が、被測定膜反射光33cと被測定膜通過光33dの干渉により生じる等傾角干渉縞から、薄膜特性値を測定することは先に述べた。この場合、被測定膜反射光33cと被測定膜通過光33dの振幅が等しいほど干渉縞のコントラストが大きくなり、測定精度は向上する。

【0090】これに対し、測定光32が感光波長 λ_b の光の場合は、被測定膜21に吸収性があるため、膜中を通過する間に振幅が減衰する。このため被測定膜通過光33dの振幅が被測定膜反射光33cに比べ小さくなり、干渉縞のコントラストが低下する。

【0091】図5の理論計算例でも吸収係数が大きいほど等傾角干渉縞、すなわち入射角依存強度反射率の変化が小さくなっている。膜中での吸収のためにコントラストが低下した干渉縞は、膜厚に関する情報を多く持っていない。このため感光波長で測定した場合、吸収性のある感光性薄膜の膜厚、屈折率、吸収係数の3つの未知数を精度良く測定することは難しい。

【0092】このため感光性薄膜の特性値を精度良く測定するため、感光波長での測定だけでなく非感光波長の測定も行う。図14(c)に示すように、非感光波長 λ_a の測定光32を用いると、被測定膜通過光33dは膜内

で減衰しないため、膜厚に関する情報を十分含んだ良好なコントラストの干渉縞を検出できる。そこで測定光 32 の波長が非感光波長 λ_a の場合の干渉縞から、被測定膜 21 の膜厚と非感光波長 λ_a における屈折率と吸収係数をまず求める。次に測定光 32 の波長を感光波長 λ_b として測定する。ここでは非感光波長 λ_a での測定で求めた膜厚を既知の値として扱い、感光波長 λ_b における屈折率と吸収係数を求めればよい。

【0093】本発明は感光性薄膜の吸収係数が分光特性を有することに着目し、非感光波長と感光波長の 2 波長で測定することにより、膜厚と露光波長における屈折率と吸収係数を求める手法である。以下、本発明を 2 波長測定法と呼ぶことにする。

【0094】以上の 2 波長測定法に基づく薄膜特性値測定装置の実施例を図 15 に示す。本実施例は非感光波長透過用単色光フィルタ 4a と感光波長透過用単色光フィルタ 4b を交換できる光学系と、各波長での検出信号を処理できるようにしたものである。非感光波長測定での検出信号処理系は、被測定膜の反射光強度分布を記憶する被測定膜メモリ 8a、参照試料の反射光強度分布を記憶する参照試料メモリ 9a、センサの暗レベルを記憶する暗レベルメモリ 12a、被測定膜の入射角依存強度反射率を求める反射率演算部 10a、薄膜特性値を求める *

$$C_1 = \frac{d_{\max} - d_{\min}}{d_r} \times \frac{n_{\max} - n_{\min}}{n_r} \times \frac{k_{\max} - k_{\min}}{k_r} \\ = N_d \cdot N_n \cdot N_k \quad \dots\dots (数11)$$

【0098】と表される。ただし、 N_d 、 N_n 、 N_k は各特性値の分解点数である。一方、2 波長測定では、非感光波長における吸収係数が 0、感光波長測定での膜厚 ※

*特性値決定部 11a からなる。

【0095】一方、感光波長測定での検出信号処理系は、被測定膜の反射光強度分布を記憶する被測定膜メモリ 8b、参照試料の反射光強度分布を記憶する参照試料メモリ 9b、センサの暗レベルを記憶する暗レベルメモリ 12b、被測定膜の入射角依存強度反射率を求める反射率演算部 10b、薄膜特性値を求める特性値決定部 11b からなる。感光波長の特性値決定部 11b は、非感光波長の特性値決定部 11a で求めた膜厚 d を既知の値として用い、感光波長における屈折率 n と吸収係数 k を求める。もちろん感光波長の特性値決定部 11b は、非感光波長の特性値決定部 11a で求めた膜厚 d を粗検出結果として扱い、膜厚範囲を $d \pm \Delta d$ に限定して膜厚を再度に決定してもよい。

【0096】2 波長測定法は、感光性薄膜の測定に有益なだけでなく、膜特性値決定のための計算量低減にも効果がある。被測定膜で可能性のある膜厚 d 、屈折率 n 、吸収係数 k の最大、最小を \max 、 \min の添字で示し、測定分解能を d_r 、 n_r 、 k_r とする。1 波長だけの測定で 3 つの未知数を決定するために必要な、(数 9) もしくは (数 10) の計算回数 C_1 は、(数 11) に示したように、

【0097】

【数 11】

$$\frac{k_{\max} - k_{\min}}{k_r}$$

..... (数11)

※は既知として扱うことにすれば、計算回数 C_2 は

【0099】

【数 25】

$$C_2 = \frac{d_{\max} - d_{\min}}{d_r} \times \frac{n_{\max} - n_{\min}}{n_r} + \frac{n_{\max} - n_{\min}}{n_r} \times \frac{k_{\max} - k_{\min}}{k_r} \\ = N_d \cdot N_n + N_n \cdot N_k \\ = N_n \cdot (N_d + N_k) \quad \dots\dots (数25)$$

【0100】となる。ここで

40 ★【数 26】

【0101】

$$N_d \cdot N_k - (N_d + N_k) = (N_d - 1)(N_k - 1) - 1$$

..... (数26)

【0102】であるので、 N_d 、 N_k がともに 2 より大きい場合は、 $C_1 > C_2$ を満足する。薄膜特性値測定では、 N_d と N_k は一般に 2 よりはるかに大きいので、2 波長測定をすることで、計算量を大幅に低減でき、高速に特性値を決定できる。

【0103】次に吸収性のある感光性薄膜の特性値を精度良く測定するための他の実施例を説明する。

【0104】本実施例では、感光波長での測定を、十分

長い時間測定光を照射した露光後にも行う。図 14(a) に示すように、ホトレジストの感光波長 λ_b の光を照射しホトレジスト膜を露光すると、光エネルギーを吸収して組成が変わり、吸収係数が低下する。この状態では図 14(d) に示すように、感光波長 λ_b の測定光 32 を用いても、被測定膜通過光 33 d の膜内での減衰が少なくなるため、膜厚に関する情報を含んだ干渉縞を検出でき。そこで、感光波長 λ_b の測定光 32 を照射し始めた

19

ときの干渉縞 s と、被測定膜21が測定光32により十分露光し吸収係数が低下したときの干渉縞 e を検出する。そしてまず干渉縞 e より、露光後の膜厚 d 、屈折率 n_s 、吸収係数 k_s を求める。次にここで求めた膜厚 d を既知の値として、干渉縞 s から測定開始時の屈折率 n_s と吸収係数 k_s を求める。

【0105】露光前後に膜厚変動がある場合などには、膜厚範囲を $d \pm \Delta d$ に限定して屈折率 n_s 、吸収係数 k_s とともに測定開始時の膜厚を再度決定してもよい。本発明は、感光性薄膜の吸収係数が、露光後に減少することに着目し、露光前後の検出結果を用い、膜厚と露光波長における屈折率と吸収係数を求める手法である。以下、本発明を露光前後測定法と呼ぶことにする。

【0106】上記した露光前後測定法に基づく薄膜特性値測定装置の実施例を図16に示す。

【0107】本実施例は、図6と同様な光学系、参照試料の反射光強度分布を記憶する参照試料メモリ9、センサの暗レベルを記憶する暗レベルメモリ12、露光後の膜特性値を求める信号処理系、測定開始時の膜特性値を求める信号処理系からなる。露光後の膜特性値を求める信号処理系は、露光後の被測定膜の反射光強度分布を記憶する被測定膜メモリ8e、反射率演算部10e、特性値決定部11eからなる。また測定開始時の膜特性値を求める信号処理系は、測定開始時の反射光強度分布を記憶する被測定膜メモリ8s、反射率演算部10s、特性値決定部11sからなる。

【0108】測定開始時の特性値決定部11sは、露光後の特性値決定部11eで求めた膜厚 d を既知の値として用い、測定開始時の屈折率 n と吸収係数 k を求める。もちろん特性値決定部11sは、特性値決定部11eで求めた膜厚 d を粗検出結果として扱い、膜厚範囲を $d \pm \Delta d$ に限定して、測定開始時の屈折率 n と吸収係数 k とともに膜厚を再度決定してもよい。

【0109】本発明を他の光学系の構成で実現する実施例を図17で説明する。

【0110】本実施例は、図6で示した照明側レンズ5と検出側レンズ6の光軸の入射角 θd を0度にしたもので、照明側レンズ5と検出側レンズ6を、光軸が被測定膜に垂直な一つの対物レンズ41に置き換えたものである。

【0111】本測定装置の光学系は、光源1、コリメート用レンズ2、偏光素子3、非感光波長透過用単色光フィルタ4a、感光波長透過用単色光フィルタ4b、ハーフミラー55、光電変換型の光量検出器58、ハーフミラー43、対物レンズ41、リレーレンズ42、光量蓄積型のリニアセンサ7からなる。リレーレンズ42は、対物レンズ41の後焦点面34上の強度分布をリニアセンサ7のセンサ面に投影する。信号処理系は、光量変動補正部80、加算平均部13、被測定膜21の反射光強度分布を記憶する被測定膜メモリ8、参照試料22の反

20

射光強度分布を記憶する参照試料メモリ9、センサの暗レベルを記憶する暗レベルメモリ12、被測定膜21の入射角依存強度反射率を求める反射率演算部10、数9もしくは数10の評価関数 M を用いて薄膜特性値を求める特性値決定部11からなる。

【0112】本光学系は、数3から分かるように、光路差が生じやすい入射角0度付近の干渉縞を検出できるため、測定感度を向上できる利点がある。また光学系の調整が容易になることも本実施例の利点である。

【0113】次に上記光学系を用い、測定精度を向上するための他の実施例を説明する。まず精度劣化原因を説明する。被測定膜に光軸が垂直な一つの対物レンズ41を用いた光学系では、図18に示すように光軸付近を通過する照明光32eによる迷光が、測定誤差要因となる。なぜなら対物レンズ41の光軸付近は光軸にほぼ垂直なため、光軸付近を通過する照明光32eが対物レンズ41の表面で反射した光は、迷光としてリニアセンサ7で検出されてしまう。このため本来検出すべき反射光強度分布44に対し、リニアセンサ7で実際に検出される反射光強度分布45は、光軸周辺で強度が増加したものとなる。このため膜特性値の測定誤差が生じる。この迷光は対物レンズ41と被測定膜21の間での反射によっても生じるため、試料を退避した状態で暗レベル検出を行っても完全には除去できない。

【0114】一方、対物レンズ41の光軸から離れたところは、表面が光軸に対し傾いているため、ここを通過する照明光32cの反射光はリレーレンズを通過できないため迷光にはならない。

【0115】対物レンズ41の光軸付近を通過する照明光32eによる迷光を除去するには、測定光波長を反射防止するコーティングを対物レンズ41の表面に施すことが有効である。測定光がある決められた1つの波長の場合には、この方法でよい。しかし前述のように感光性薄膜の測定するため、感光/非感光の2つの波長の測定光を使用する場合は、両波長を共に反射防止する必要がある。このような反射防止コーティングを実現することは技術的に容易ではなく、できたとしても製造コストが増加する。また感光性薄膜の種類や露光波長は多岐に及ぶため、一つの測定装置で多くの種類の感光性薄膜を測定するには、広い波長範囲での反射防止コーティングが必要となり、これは実現困難である。そこで反射防止コーティング以外の迷光防止法が必要となる。

【0116】反射防止コーティングによらない迷光防止法の実施例を図19に示す。本実施例は光軸付近の照明光線を遮光することで、対物レンズ41の光軸付近の迷光を防止し、後焦点面上の反射光強度分布をリニアセンサ7で検出する方法の原理図を示している。同図(a)の実施例は、光軸付近を通過する照明光を遮光板46で遮光し、ハーフミラー43で反射し、対物レンズ41に入射させるものである。照明光32fは被測定膜21で反

射し、リニアセンサ 7 の領域 7 f で検出され、照明光 3 2 g は領域 7 g で検出される。光軸付近は照明されないで、迷光を含まず後焦点面上の反射光強度分布を検出できる。

【0117】同図(b)の実施例は、光軸付近を通過する照明光を含めて、後焦点面の半分を遮光板 4 7 で遮光し、ミラー 4 8 で反射し、対物レンズ 4 1 に入射させるものである。照明光 3 2 f は被測定膜 2 1 で反射し、リニアセンサ 7 で検出される。この実施例でも光軸付近は照明されないで、迷光を含まず後焦点面上の反射光強度分布を検出できる。

【0118】感光性薄膜を感光波長で測定する場合には、照明光により被測定膜の化学的な組成が徐々に変化する。このため感光性薄膜の露光を抑制しつつ、かつリニアセンサ 7 が十分な S/N 比で検出できる反射光量を確保すべきである。図 19(b)の実施例では、被測定膜 2 1 を反射した光が直接リニアセンサ 7 に達する。このため被測定膜 2 1 に照射される照明光量が同一でも、ハーフミラー 4 3 を使用する同図(a)の実施例に比べ、大きな反射光量が得られる。被測定膜をあまり露光せず、後焦点面上の反射光強度分布を精度よく測定するため、感光性薄膜を感光波長で測定するには同図(b)の光学系の構成が適している。

【0119】図 1 は本発明において、図 19(b)の実施例の原理にもとづき光軸付近の迷光を防止した薄膜特性値測定装置の実施例を示す。本実施例は、感光性薄膜を測定するため 2 波長測定法を適用し、さらに感光/非感光の 2 つの波長での測定を同時に行うことができる光学系の構成を示している。

【0120】まず光軸付近の迷光を防止する光学系の実施例を主体に説明する。図 1 に示す光学系は、照明系、光量検出系、後焦点面検出系、試料面検出系からなり、同図において照明光は実線、試料面から反射光は破線で示している。照明系は、水銀ランプ光源 1、集光レンズ 4 8、赤外線を吸収する熱線吸収フィルタ 4 9、シャッター 5 0、レンズ 5 1、フィルタ 4 c、非感光波長透過用単色光フィルタ 4 d、遮光板 4 7、レンズ 5 2、視野絞り 5 3、レンズ 5 4、偏光板 3、直角ミラー 6 0、フィールドレンズ 6 1、結像レンズ 6 2、無限遠補正系の対物レンズ 4 1 からなる。光量検出系はハーフミラー 5 5、ダイクロイックミラー 5 6、非感光波長透過用単色光フィルタ 5 7、非感光波長光量検出器 5 8 a、感光波長光量検出器 5 8 b からなる。

【0121】後焦点面検出系は、対物レンズ 4 1、結像レンズ 6 2、直角ミラー 6 0、フィールドレンズ 6 1、リレーレンズ 6 7、ダイクロイックミラー 6 8、非感光波長透過用単色光フィルタ 6 9、非感光波長での後焦点面強度分布検出用リニアセンサ 7 a、感光波長での後焦点面強度分布検出用リニアセンサ 7 b からなる。試料面検出系は対物レンズ 4 1、結像レンズ 6 2、直角ミラ

ー 6 0、フィールドレンズ 6 1、ハーフミラー 6 6、非感光波長透過用単色光フィルタ 7 1、TV カメラ 7 2 からなる。なお移動機構 6 5 上の載置台 6 4 には、被測定膜 2 1 を形成した基板 2 3 と参照試料 2 2 と試料面光量検出器 6 3 が搭載され、測定位置にそれぞれを任意に移動できる。また載置台 6 4 を測定位置から退避することもできる。試料面光量検出器 6 3 は、感光波長の測定光の照射光量を測定するために設置されている。

【0122】光源 1 は集光レンズ 4 8 により結像し、レンズ 5 1 に入射させる。光源結像位置からレンズ 5 1 までは、レンズ 5 1 の焦点距離だけ離れており、遮光板 4 7 はレンズ 5 1 の後側焦点位置に置かれる。遮光板 4 7 は、レンズ 5 2 とレンズ 5 4 により、直角ミラー 6 0 の直交面 3 4 b に投影される。また直交面 3 4 b はフィールドレンズ 6 1 と結像レンズ 6 2 により、対物レンズ 4 1 の後焦点面 3 4 と共役な位置関係にある。従って遮光板 4 7 と対物レンズ 4 1 の後焦点面 3 4 は共役な位置関係となり、遮光板 4 7 の位置を調節することで、対物レンズ 4 1 の光軸周辺に照明光が達しないようにすることができ、迷光を防止できる。

【0123】なおシャッター 5 0 は、不要な光を非測定膜に照射しないために設置されている。また被測定膜 2 1 を感光せずに試料面を観察したい場合は、フィルタ 4 c を非感光波長光透過用フィルタ 4 d に交換すればよい。

【0124】光量検出器 5 8 a、5 8 b は直交面 3 4 b と共役な位置に設置され、いずれも光電変換面は遮光板 4 7 を通過した全照明光束を検出できる感光面を有する検出器を用いる。光量検出器 5 8 a、5 8 b の検出信号は光源 1 の光量変動を観測するもので、この検出信号を用いれば光量変動による反射光強度分布検出信号の変動を補正でき、測定精度を向上できる。

【0125】レンズ 5 1 の手前で結像した光源像は、レンズ 5 1 とレンズ 5 2 により、視野絞り 5 3 を設置した位置に再結像する。視野絞り 5 3 はレンズ 5 4 とフィールドレンズ 6 1 により、試料面の第 1 結像面 7 0 に投影される。試料面の第 1 結像位置 7 0 は、無限遠補正系の対物レンズ 4 1 と結像レンズ 6 2 により、試料面を結像する位置である。従って、視野絞り 5 3 は試料面と共役な位置関係にあり、視野絞り 5 3 の径を調整することで、試料面で照明光が照射される領域を制限できる。

【0126】被測定膜 2 1 で反射した光は、無限遠補正系の対物レンズ 4 1 と結像レンズ 6 2 により、第 1 結像面 7 0 に試料面の像を結像する。第 1 結像面 7 0 の試料面像は、直角ミラー 6 0 とハーフミラー 6 6 で反射した後、フィールドレンズ 6 1 の結像作用により TV カメラ 7 2 に結像する。本実施例では、試料に対し斜めに照明光が入射するため、試料面の高さ位置が変われば、TV カメラ 7 2 で撮像する試料面像が紙面の左右方向に移動する。そこで TV カメラ 7 2 で検出した試料面像の左右

方向の位置を検出することで、試料面の高さ位置を一定にする自動焦点合わせを実現できる。

【0127】被測定膜21で反射した光は、無限遠補正系の対物レンズ41の後焦点面34上で、入射角依存強度反射率に対応した反射光強度分布（等傾角干渉縞）を生じる。後焦点面34上反射光強度分布は、結像レンズ62とフィールドレンズ61により、直角ミラー60の直交面34bにまず結像する。ただし結像位置は照明光通過位置とは反対側になる。直交面34bに結像した後焦点面34上の反射光強度分布は、直角ミラー60で反射したのちレンズ67によりリニアセンサ7a、リニアセンサ7bに結像する。そしてリニアセンサ7a、7bの検出信号により、被測定膜の特性値を求める。

【0128】次に本実施例で、感光性薄膜を測定するため感光／非感光の2つの波長での測定を行う2波長測定を同時に行う方法を説明する。

【0129】2波長測定を同時に行うには、上記光学系で用いられたフィルター等を以下に示す特性にすればよい。図2(a)は水銀ランプ光源1の分光強度特性を示している。同図に示すように水銀ランプから発する光は、輝線という発光強度が非常に強い波長があり、通常これらをi線(365nm)、e線(546.1nm)などと英字で略称している。また同図(d)は半導体の露光に用いられるホトレジストの吸収係数の分光特性の一例である。

【0130】ここでは感光波長をi線、非感光波長をe線として本発明で先に説明した2波長測定を同時に行う実施例を説明する。

【0131】図1に示した照明系のフィルタ4cは、同図(b)に示す特性のものを使う。フィルタ4cはi線の単色光フィルタであるが、この種のフィルタは、原理的に長波長側に副透過帯と呼ばれる透過域が生じる。本実施例ではこの副透過帯を積極的に利用する。同図(c)は水銀ランプ光源1の光をフィルタ4cに通過させたときの分光強度特性である。感光波長域ではi線だけの単色光となるが、非感光波長は複数の輝線が残存する。このような分光特性の照明光で被測定膜21を照明し反射光を検出する。

【0132】図1に示した後焦点面検出系のダイクロイックミラー68には、同図(e)に示す特性のものを用いる。こうすればダイクロイックミラー68の透過側は感光波長のi線の単色光になる。従ってリニアセンサ7bではi線単色光で、対物レンズ41の後焦点面34上の反射光強度分布を検出できる。ダイクロイックミラー68の反射側には複数の非感光波長の輝線が含まれるため、さらに同図(f)に示す非感光波長透過用単色光フィルタ69を挿入する。この様にすることで、リニアセンサ7aではe線単色光で、対物レンズ41の後焦点面34上の反射光強度分布を検出できる。また光量検出系のダイクロイックミラー56、非感光波長透過用単色光フ

イルタ57にも同じ特性の光学素子を用いればよい。

【0133】以上の特性のフィルタとダイクロイックミラーを用い、図1の構成の光学系にすることにより、感光波長と非感光波長の後焦点面反射光強度分布検出及び光量検出を同時に行える。これにより、感光波長と非感光波長の切換えが不要となり、高速に感光性薄膜の膜厚、屈折率、吸収係数を測定できる。なお図1の試料面検出系に挿入した非感光波長透過用単色光フィルタ71も同図(f)の特性を有するものを用いれば、色収差の影響を低減でき、良好な試料面像が得られる。

【0134】図3に、図1の薄膜測定装置の信号処理系の実施例を示す。非感光波長の信号処理系は、リニアセンサ7aと光量検出器58aの信号を入力する光量変動補正部80、被測定膜の反射光強度分布を記憶する被測定膜メモリ8a、参照試料の反射光強度分布を記憶する参照試料メモリ9a、リニアセンサ7aの暗レベルを記憶する暗レベルメモリ12a、被測定膜の入射角依存強度反射率を求める反射率演算部10a、薄膜特性値を求める特性値決定部11aからなる。

【0135】反射率演算部10aは、差分回路90a、91a、割算回路92a、非感光波長での参照試料の理論反射率演算部93a、掛算回路94aにより数24の演算を実行する。感光波長の信号処理系も、同様な構成になっている。ただし感光波長の特性値決定部11bは、非感光波長の特性値決定部11aで求めた膜厚dを既知の値として用い、感光波長における屈折率nと吸収係数kを求める。もちろん感光波長の特性値決定部11bは、非感光波長の特性値決定部11aで求めた膜厚dは粗検出結果として扱い、膜厚範囲を $d \pm \Delta d$ に限定して、感光波長における屈折率と吸収係数とともに膜厚を再度決定してもよい。

【0136】前記実施例は、感光波長と非感光波長の測定を同時に行うものであるが、もちろん図15に示したように、フィルタの交換により波長を限定してもかまわない。この場合、光学系の光量検出器と後焦点面反射光強度分布検出用リニアセンサは1式だけにしてもよい。この場合、信号処理系も適宜省略できるであろう。また光源1を水銀ランプとしたが、これは水銀キセノンランプなど、被測定膜の感光／非感光波長の光を発光する光源であれば、他の光源を用いてもよい。

【0137】以上の実施例では、後焦点面の反射光強度分布検出器として1次元に光電変換素子が配列されたリニアセンサを用いていたが、2次元に光電変換素子が配列されたTVカメラを用いてもよい。2次元検出器を用いれば、後焦点面の2次元像を観察できるので、光学系の調整が容易になる利点がある。

【0138】また実施例では照明方法として光源像を試料面に結像させるクリティカル照明法で説明したが、本発明では参照試料を用いることで照度むらの影響を除去できるので、照明側レンズの後焦点面上に光源を結像さ

せるケーラー照明にしてもよい。

【0139】以上、本発明によれば、等傾角干渉縞を検出することで、被測定膜の入射角依存強度反射率を絶対値を正確に求めることができ、これにより薄膜の膜厚、屈折率、吸収係数を高精度かつ高速に測定することが可能になる。また工業上重要な感光性薄膜の測定においても、感光材料の分光特性に着目した感光波長及び非感光波長の2波長で検出することにより、感光波長における屈折率と吸収係数も高精度かつ高速に測定できる。

【0140】

【発明の効果】本発明によれば、薄膜の膜厚、屈折率、吸収係数を高精度に測定することができ、特にホトレジスト等の感光性薄膜の測定に有効である。例えば半導体製造業においては、パターン寸法精度を劣化させるホトレジスト膜の膜厚、屈折率、吸収係数の変動を容易に検出できるため、ホトレジストの品質管理や塗布装置の動作監視を従来より高精度に行える。これにより半導体製造歩留まりの向上に大きく寄与できる。このほか、感光性薄膜を用いるリソグラフィ技術を応用した各種工業分野でも同様な効果が得られる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の薄膜特性値測定装置の構成図である。

【図2】本発明の薄膜特性値測定装置に用いる光学素子特性の説明図である。

【図3】本発明の薄膜特性値測定装置の薄膜特性値測定装置の信号処理系の機能ブロック図である。

【図4】等傾角干渉の原理図である。

【図5】入射角依存強度反射率の理論計算例である。

【図6】鏡面参照試料を用いて被測定膜の入射角依存強度反射率を求め薄膜特性値を測定する装置の構成図である。

【図7】平行光束の入射角と後焦点面上集光位置の関係の説明図である。

【図8】鏡面参照試料を用いて被測定膜の入射角依存強度反射率を求める方法の原理図である。

【図9】被測定膜の入射角依存強度反射率を求める手順の説明図である。

【図10】加算平均処理で測定精度を向上する薄膜特性値測定装置の構成図である。

【図11】照明光量変動補正により測定精度を向上する薄膜特性値測定装置の構成図である。

【図12】照明光量変動補正の原理図である。

【図13】照明光量変動補正回路の機能ブロック図である。

【図14】感光性薄膜を測定するための2波長測定法と露光前後測定法の原理説明図である。

【図15】2波長測定法を適用した薄膜特性値測定装置の構成図である。

【図16】露光前後測定法を適用した薄膜特性値測定装置の構成図である。

【図17】光軸が被測定膜に垂直なレンズを検出光学系に用いた薄膜特性値測定装置の構成図である。

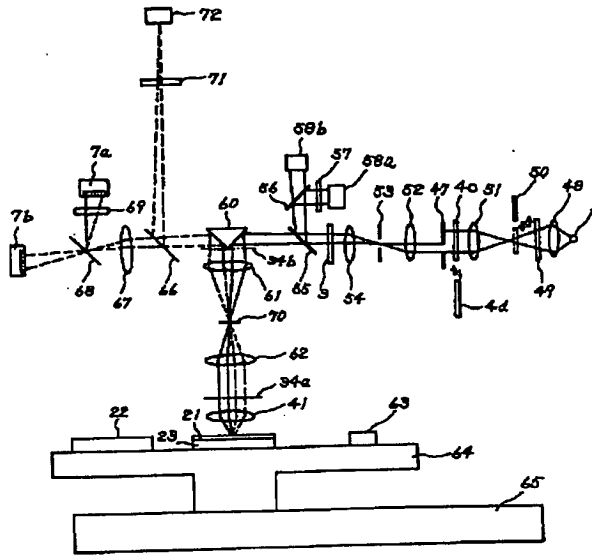
【図18】光軸が被測定膜に垂直なレンズを用いた検出光学系で生じる迷光の説明図である。

【図19】光軸が被測定膜に垂直なレンズを用いた検出光学系で生じる迷光防止方法の説明図である。

【符号の説明】

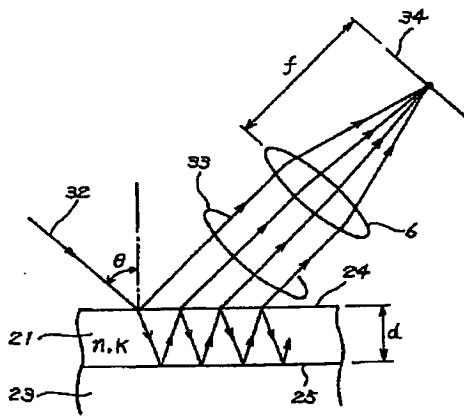
- 1…光源 2…コリメート用レンズ 3…偏光板
4…単色光透過フィルタ 4a…非感光波長透過用
10 単色光フィルタ 4b…感光波長透過用単色光フィルタ 4c…フィルタ 4d…非感光波長透過用フィルタ 5…照明側レンズ 6…検出側レンズ 7…リニアセンサ 7a…非感光波長光検出用リニアセンサ 7b…感光波長光検出用リニアセンサ 8…被測定膜メモリ 9…参照試料メモリ 10…反射率演算部 11…特性値決定部
12…暗レベルメモリ 13…加算平均部 21…被測定膜 22…参照試料 23…被測定膜を形成した基板 24…空気と被測定膜の境界面
20 25…被測定膜を形成した基板と被測定膜の境界面 31…照明光強度むら 32…照明光 33…反射光 33c…被測定膜反射光 33d…被測定膜通過光 34…検出側レンズの後焦点面 36…検出側レンズの光軸 41…対物レンズ 42…リレーレンズ 43…ハーフミラー 44…迷光を含まない反射光強度分布 45…迷光を含んだ反射光強度分布 46…遮光板 47…遮光板 49…熱線吸収フィルタ 50…シャッター
51…レンズ 52…レンズ 53…視野絞り 54…レンズ 55…ハーフミラー 56…ダイクロイックミラー 57…非感光波長透過用単色光フィルタ 58…光量検出器 58a…非感光波長光量検出器 58b…感光波長光量検出器 60…直角ミラー 61…フィールドレンズ 62…結像レンズ 63…試料面光量検出器 64…載置台 65…移動機構 66…ハーフミラー 67…リレーレンズ 68…ダイクロイックミラー 69…非感光波長透過用単色光フィルタ 70…ハーフミラー 71…非感光波長透過用単色光フィルタ 72…TVカメラ 73…暗レベル用記憶装置 80…光量変動補正部 81…積分回路 83…A/D変換器 84…サンプル・ホールド回路 85…A/D変換器 86…デジタル割算器 87…アナログ割算器 88…A/D変換器 89…光量変動補正部 90…差分回路 91…差分回路 92…割算回路 93…参照試料の理論反射率演算部 94…掛算回路

【図1】



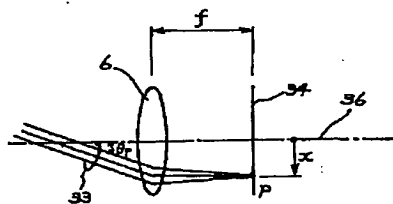
【図4】

図 4



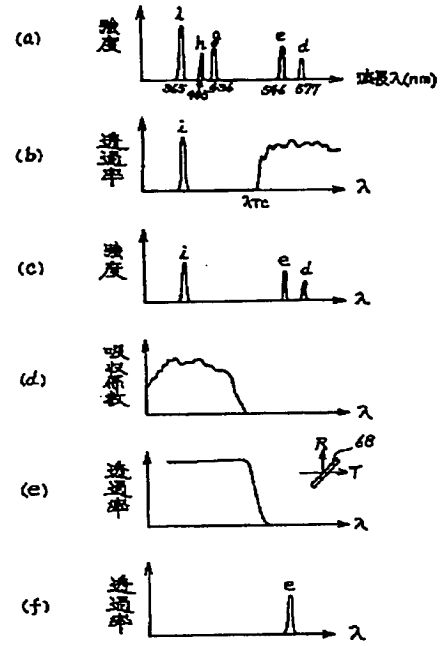
【図7】

図 7



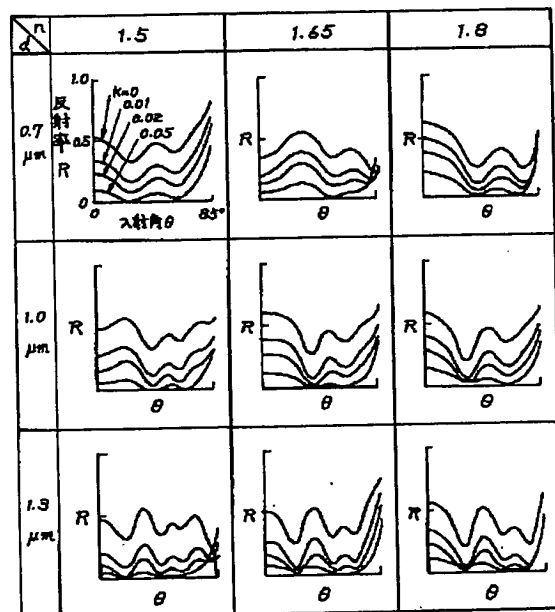
【図2】

図 2

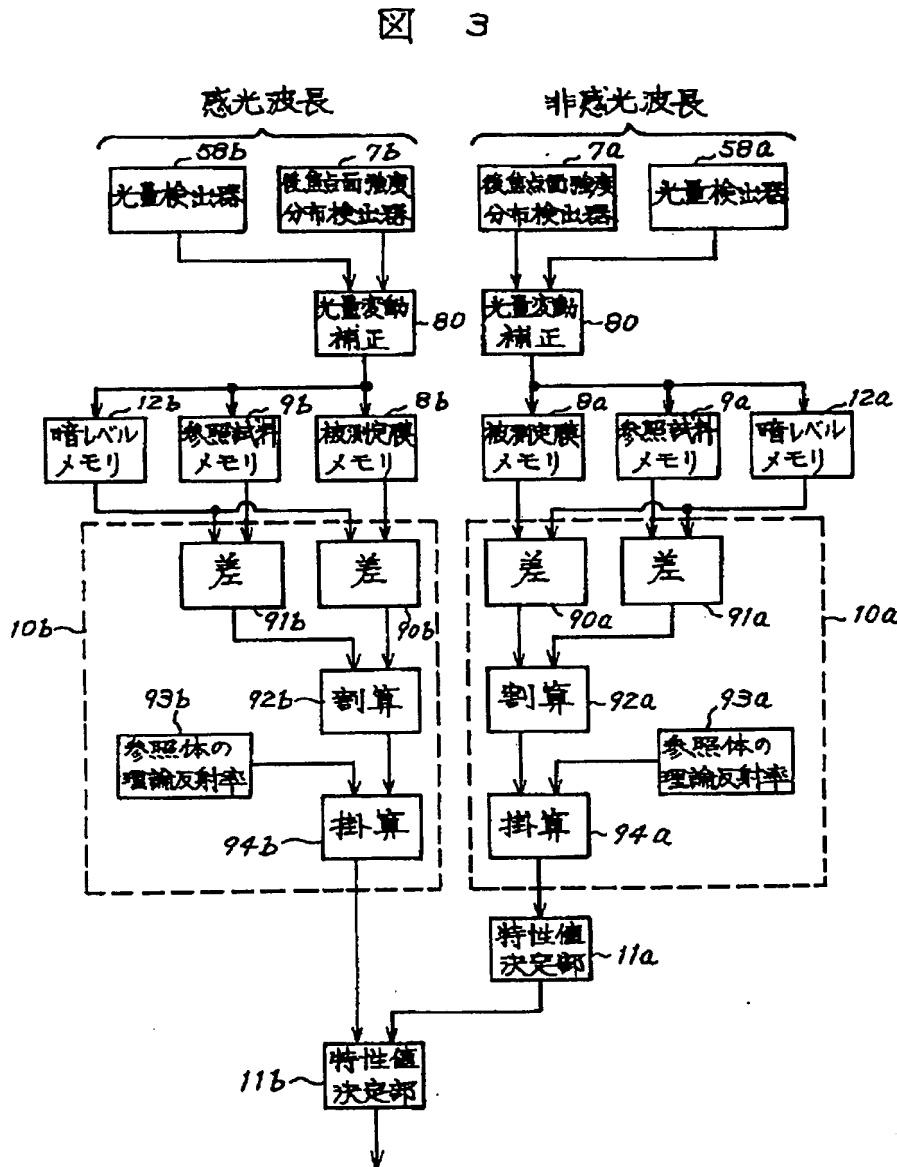


【図5】

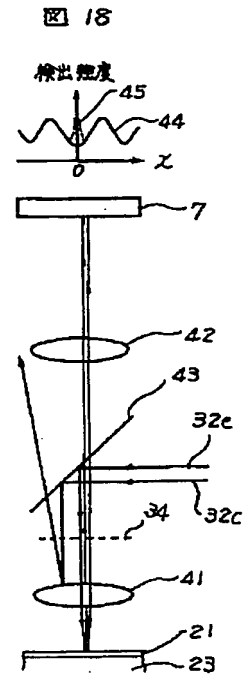
図 5



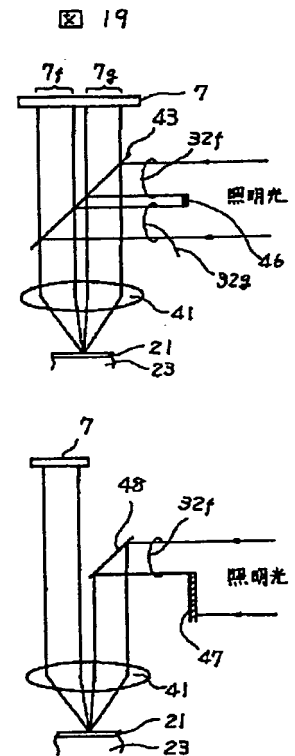
【図 3】



【図 18】

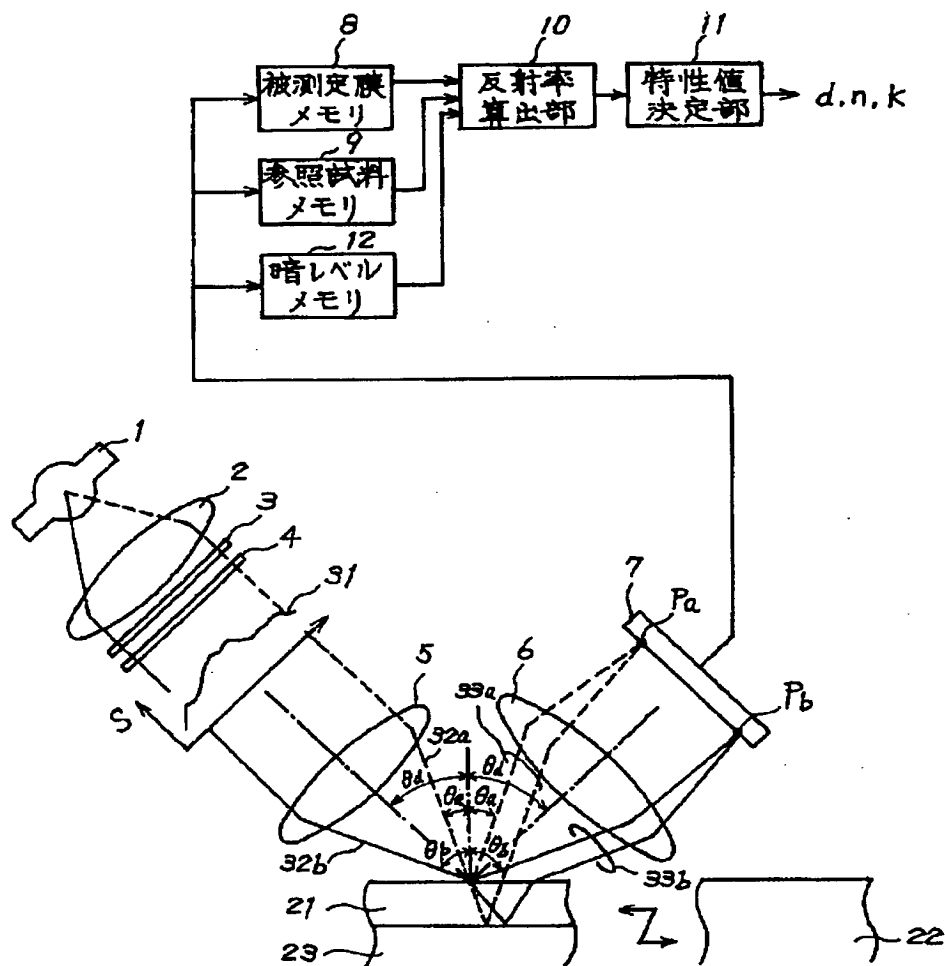


【図 19】



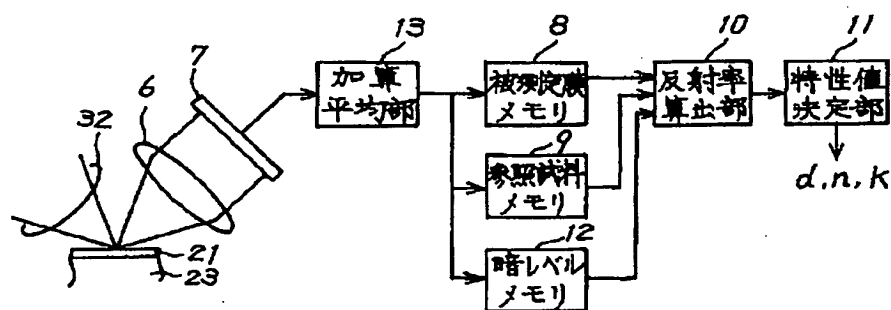
【図6】

図 6



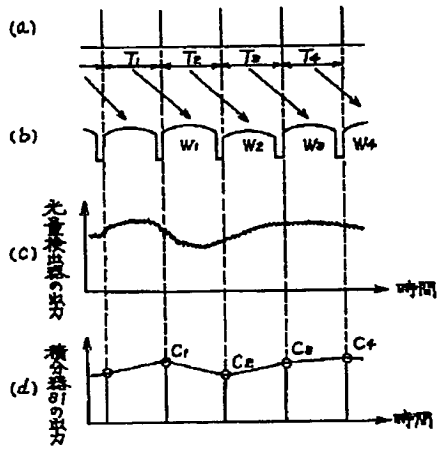
【図10】

図 10



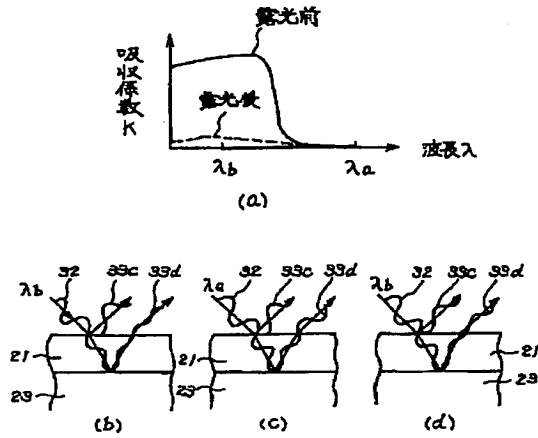
【図12】

図 12



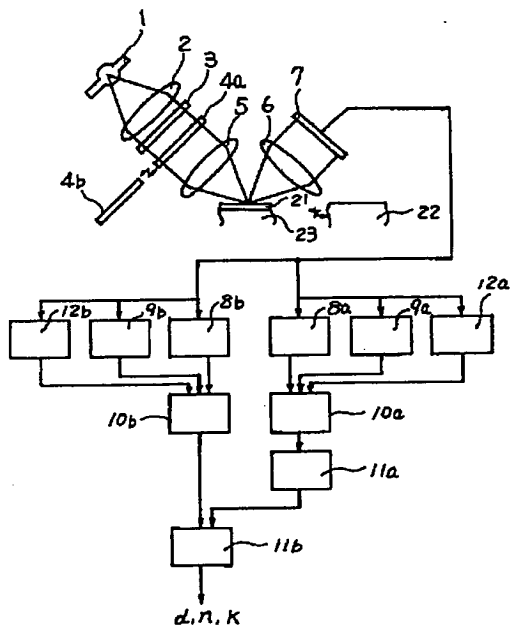
【図14】

図 14



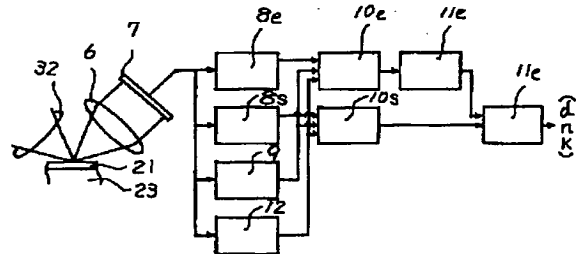
【図15】

図 15



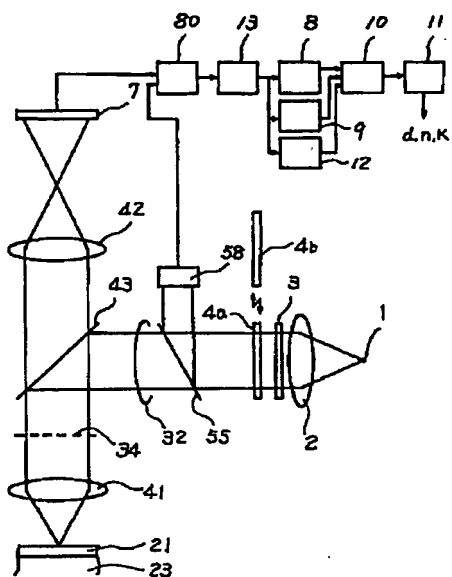
【図16】

図 16



【図 17】

図 17



フロントページの続き

(72)発明者 窪田 仁志

神奈川県横浜市戸塚区吉田町292番地 株
式会社日立製作所生産技術研究所内